

Actuaciones estructurales acometidas en la reforma del estadio Santiago Bernabéu

Structural works carried out during the renovation of the Santiago Bernabéu stadium

Carlos de Aranda Sancha^a, Carlota Manzanares Bennett^b y Luis A. Frias Cerdá^c

^a Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. Responsable estructural de la Dirección Facultativa de la Reforma del Estadio Santiago Bernabéu. Ayesa, Jefe de Proyecto. caranda@ayesa.com

^b Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. Ayesa, Sección de Estructuras. cmanzanares@ayesa.com

^c Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. Ayesa, Jefe de Sección de Estructuras. lafrias@ayesa.com

RESUMEN

La reforma del estadio Santiago Bernabéu ha transformado el estadio de forma global. La intervención ha dotado al estadio de una nueva envolvente (fachada, cubierta fija y cubierta retráctil), un edificio adosado en el lateral este y otro colgado sobre el paseo de La Castellana, un anillo logístico situado bajo las gradas del estadio al que se accede por un nuevo túnel de carros, el hipogeo que hace de invernadero para el césped, y un nuevo aparcamiento bajo la esquina de la plaza de Los Sagrados Corazones, además se ha reforzado la estructura de hormigón original del estadio, inaugurado en 1947.

ABSTRACT

The renovation of the Santiago Bernabéu stadium has transformed the stadium as a whole. The intervention has provided the stadium with a new envelope (facade, fixed roof and retractable roof), an adjoining building on the east side and another one hanging over the Paseo de La Castellana, a logistic ring located under the stands of the stadium which is accessed by a new carriage tunnel, the hypogeum that serves as a greenhouse for the grass, and a new parking lot under the corner of the Plaza de Los Sagrados Corazones. In addition, the original concrete structure of the stadium, inaugurated in 1947, has been reinforced.

PALABRAS CLAVE: Estadio, Santiago Bernabéu, Real Madrid, reforma.

KEYWORDS: Stadium, Santiago Bernabéu, Real Madrid, reform, renovation.

1. Actuaciones acometidas.

El estadio Santiago Bernabéu se inauguró en el año 1947, y aunque en los años 1982, 1992 y 2007 se acometieron importantes reformas, ha sido la realizada estos años la que ha transformado el estadio de forma global.

La reforma del estadio ha sido un gran desafío tanto técnico como logístico y organizativo. La obra, inmersa en la ciudad de Madrid en pleno Paseo de La Castellana, debía

ser compatible con la ciudad y las actividades del club. Con este fin, el proyecto fue subdividido en más de 40 subproyectos que se fueron activado o desactivado según avanzaba la obra.

En esta intervención se ha dotado al estadio de una nueva envolvente de acero inoxidable en la fachada y la cubierta fija (de la que se descuelga un videomarcador 360°),

empleándose en la estructura aceros de calidad S355J2/K2, S460M y S690QL1.

Se ha construido una cubierta retráctil que salva una luz de 73 m utilizando en su estructura fibra de carbono y madera de balsa.

Se ha ejecutado un nuevo edificio museo de 3 plantas colgado de una estructura/puente que apoya en las nuevas torres del lateral del paseo de La Castellana. Se ha incorporado al estadio otro edificio en la calle del Padre Damián, y ampliado el aparcamiento existente, pasando de 3 a 4 plantas subterráneas con alturas libres de hasta 5,50 m. Se ha construido un invernadero subterráneo de 30 metros de profundidad para guardar el césped, ofreciendo al club una plataforma de hormigón armado totalmente despejada que abre la posibilidad de organizar eventos durante la temporada deportiva.

Alrededor del terreno de juego, bajo gradas, se ha ejecutado una galería técnica perimetral que hace de anillo de distribución de mercancías e instalaciones, y un nuevo túnel de carros que conecta el nuevo aparcamiento subterráneo con el terreno de juego. A nivel del cuarto anfiteatro se ha ejecutado una terraza-mirador con vistas a Madrid de 360°.

Se ha reforzado la estructura original del estadio de hormigón armado del año 1947 en todos sus niveles, actuando en todas las losas y vigas, y también en los pilares de la primera alineación, para adaptarla a las exigencias de las nuevas actividades y usos a desarrollar en el estadio.

2. Envoltente

La reforma ha dotado al estadio de una nueva envoltente de lamas de acero inoxidable que engalanan la fachada y el sofito, y la cubierta fija.

2.1 Fachada

Las lamas de acero inoxidable están formadas por una chapa de 1.8 mm con acabado 2M

Emboss "lino", tienen una geometría unívoca para cada una de ellas con directriz curva de radio variable con un ancho máximo de 1250 mm y una longitud media de 3500 mm, llegando a una longitud máxima de 4000 mm.



Figuras 1 y 2. Fachada del estadio en el entorno de la torre A junto a la plaza de Los sagrados Corazones.

La fachada se divide en tres tramos y sofito:

- Tramo superior, situado sobre la terraza llamada Skywalk, compuesto por 11 líneas de lamas en las que la inclinación varía desde una posición casi horizontal a una posición casi vertical en los fondos norte y sur.
- Tramo intermedio compuesto por 22 líneas de lamas desplomadas hacia el estadio.
- Tramo inferior compuesto por 16 líneas de lamas desplomadas hacia la calle.
- Sofito o falso techo de lamas que conecta el tramo inferior con la estructura propia del estadio.

Las líneas de lamas están fijadas a la fachada del estadio por medio de bastidores de acero. Estos bastidores se descuelgan de la estructura corona en el lateral oeste, de la

cubierta en los fondos norte y sur, y de la corona del nuevo edificio adosado al estadio en el este.

2.2 Cubierta fija

La nueva cubierta del estadio consta de un perímetro fijo situado sobre las gradas, y de una cubierta de retráctil que cubre el área del terreno de juego.

La cubierta fija se ha diseñado metálica con uniones atornilladas. Apoyada en cuatro puntos, las dos nuevas torres de evacuación situadas en el lateral del paseo de La Castellana, y en dos péndulos invertidos situados en el lateral de la calle del Padre Damián, que permiten respirar a la estructura en dirección este oeste ante los movimientos producidos por la acción del viento o por dilatación térmica.

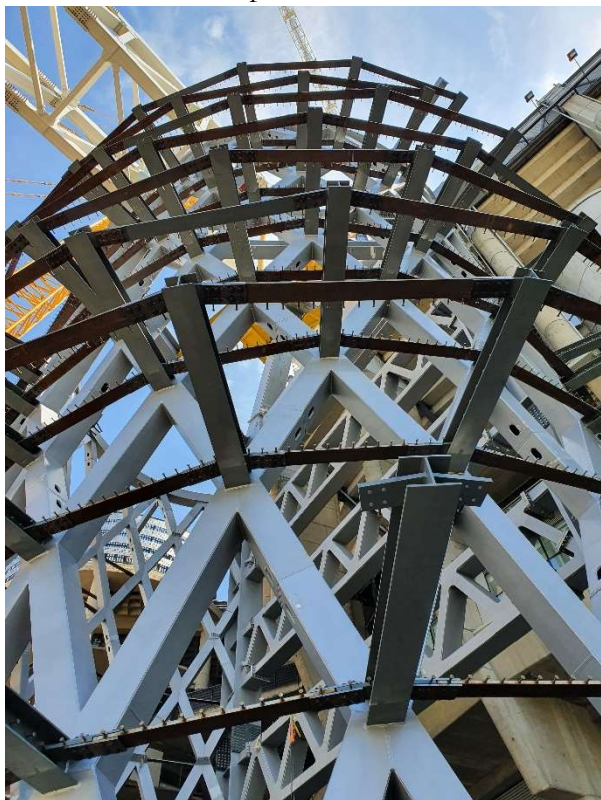


Figura 3. Estructura metálica de la Torre C para el apoyo de la cercha atirantada norte de la cubierta.

El sistema estructural consta de dos cerchas principales atirantadas en dirección oeste–este, que junto con dos cerchas en los bordes de los fondos norte y sur forman los paños de cubierta norte y sur, y cuatro cerchas secundarias en dirección norte–sur, que

delimitan el borde de la cubierta en los laterales del estadio y al terreno de juego, formando los paños del oeste y del este. Los paños se completan con cerchas más pequeñas y vigas que sustentan el paquete de cubierta formado por una chapa grecada perforada, dos paneles de lana de roca y un panel sándwich Kalzip, sobre el que descansan las lamas de acero inoxidable, similares a las de la fachada.

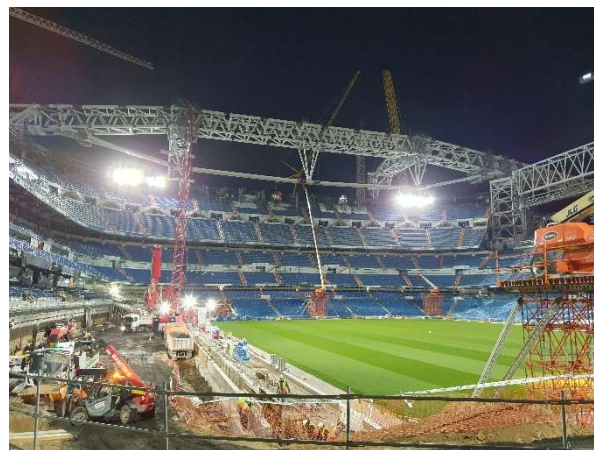


Figura 4. Cercha atirantada norte. Trabajos de apriete de tornillos en las conexiones entre la cercha y el tirante inferior.

Las cerchas principales atirantadas son de acero S460 NH. Salvan una luz de 176 m y con una sección cuadrada de 6 x 6 m para albergar en su interior pasarelas de mantenimiento. El tirante inferior está descolgado 13 m respecto a la cara inferior de la sección de la cercha, con la que conecta en cuatro puntos por agrupaciones de cuatro perfiles diagonales. Las cerchas de los fondos son de estructura metálica de acero S355 J2+ND, de 103 m de longitud y altura variable entre 5 y 10 m, su cordón superior sirve de apoyo al paño de cubierta, y de su cordón inferior arranca en voladizo el tramo norte o sur de la terraza Skywalk, de cuyo extremo se descuelgan a su vez los bastidores de las lamas de las fachadas. Esta zona de la cubierta está tan solicitada por los sucesivos aumentos de peso de elementos situados en la cubierta que ha sido necesario generar apoyos extra en los dos fondos del estadio por medio de 8 dispositivos DAC, situados entre las costillas de la fachada bajo las

cerchas de fondo. Estos dispositivos hidráulicos aportan cada uno una carga vertical constante a la estructura de la cercha de 100 Tn, absorbiendo así parte de las cargas permanentes de la cubierta.

Las cerchas secundarias son de acero S690QL1, S460M y S355 J2+N, de 138 m de longitud y una sección cuadrada de 6 x 6 m para albergar en su interior pasarelas de mantenimiento. Las cerchas que delimitan el terreno de juego sirven a su vez como pista de rodadura de las cerchas de la cubierta retráctil.

Las torres de apoyo de la cubierta están formadas por 3 pilares principales de acero S355K2, S460M y S690QL1, una estructura perimetral tipo cesta y arriostramientos tipo cercha de acero S355 J2+N, forjados interiores y rampa exterior de hormigón armado. Tiene una altura de 35 m sobre rasante más una estructura trípode de reparto de la carga del apoyo de la cubierta. Bajo rasante tienen un sótano de 4.50 m de altura para albergar aljibes, y están cimentadas con 21 pilotes de 1.80 m de diámetro y 26.5 m de longitud que parten de un encepado de 4 m de espesor.



Figura 5. Cerchas atirantadas. Proceso constructivo mediante voladizos sucesivos. Lateral oeste

Además de las grandes dimensiones de los elementos estructurales y la alta calidad de los materiales usados, cabe destacar la complejidad de su ejecución, ya que los elementos estructurales debían llegar al centro de la ciudad, acopiarse en el pequeño espacio que disponía la obra e izarlos a la vez que otros subproyectos también estaban activos, llegando a ser tan

numerosa la cantidad de medios auxiliares que para poder mover una grúa debían retirarse cuatro grúas para hacerle sitio.

El proceso constructivo de izado y colocación de cada cercha de la cubierta también fue muy complejo. Las cerchas principales atirantadas se ejecutaron mediante la colocación de módulos de cercha por voladizos sucesivos.

Las cerchas secundarias (laterales y de rodadura) se montaron al completo sobre una plataforma en el lateral del paseo de La Castellana que debía permitir la evacuación del estadio y el acceso de los vehículos de bomberos al estadio. Desde la plataforma se elevó cada una de las cerchas con el método de heavy lifting para conectarlas por sus extremos a unos carros de desplazamiento que rodando sobre las cerchas atirantadas las situaron en su posición definitiva.



Figura 6. Conexión con el carro de traslación de una cercha secundaria en la Torre C.

El resto de las cerchas que forman los paños de la cubierta se elevaron con grúa, y todas las uniones atornilladas fueron realizadas por operarios desde jaulas descolgadas de grúas.

Las conexiones de los tramos del Skywalk de la cubierta con los tramos de la corona en los laterales oeste y este se realizan por medio de unos forjados basculantes que deben adaptar su posición vertical y horizontal a los grandes movimientos relativos que hay entre las estructuras, movimientos entre los voladizos de la cubierta y los voladizos de la corona oeste o el nuevo edificio del este.

3. Cubierta retráctil

La cubierta retráctil está formada por 2 conjuntos de 6 cerchas de 73 m de longitud y algo más de 5 m de altura unidas por unos cojines inflables que forman la pendiente de la cubierta cuando están inflados y que al desinflarse quedan colgando entre las cerchas.

Los cordones inferior y superior son de fibra de carbono y núcleo de madera de balsa, mientras que las diagonales y las barras estabilizadoras, que conectan las cerchas entre sí y ayudan en su movimiento, son metálicas de acero S355 J2H. Los cojines inflables son de telas plásticas Sefar Tenera 4T40HF

La cubierta retráctil realiza su despliegue mediante una traslación a lo largo del borde de las cerchas secundarias de rodadura partiendo de su aparcamiento situado bajo la cubierta fija en los fondos norte y sur, hasta el centro del terreno de juego en donde se encuentran ambos conjuntos (movimiento sincronizado muy complejo). Tras finalizar su despliegue, los conjuntos pueden elevarse hasta quedar enrasados con el borde de la cubierta fija.

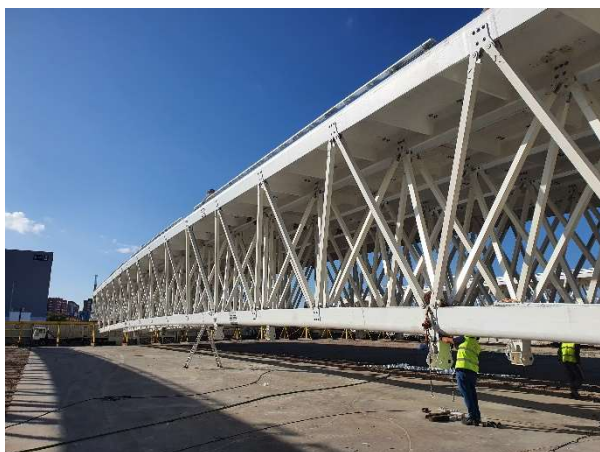


Figura 7. Cercha de la cubierta retráctil en la campa de los talleres de Inbersa en Fuenlabrada.

4. Videomarcador 360°

De las cerchas de la cubierta que enmarcan el terreno de juego (cerchas atirantadas y de rodadura) se ha descolgado el videomarcador 360°, y varias pantallas traseras que dan servicio

a los niveles más altos del estadio. Este videomarcador tiene una altura de 11 m en los fondos y 6.30 m en los laterales.

La estructura del videomarcador es metálica atornillada de acero S355 JR y el suelo de las pasarelas que la recorren es un composite de fibra de carbono el fondos y laterales, y tramex en las esquinas.

Además del videomarcador propiamente dicho, la estructura aloja la maquinaria de la skycam, calefactores y arrays de sonido, y es compatible con los grandes movimientos derivados del desplazamiento de la cubierta retráctil.

Al contrario que la mayoría de las estructuras metálicas que llegaron al estadio premontadas en módulos que se conectaron in situ, los módulos de la estructura del videomarcador se montaron en el terreno de juego para ser izados posteriormente y conectados en altura por medio de cestas con operarios.

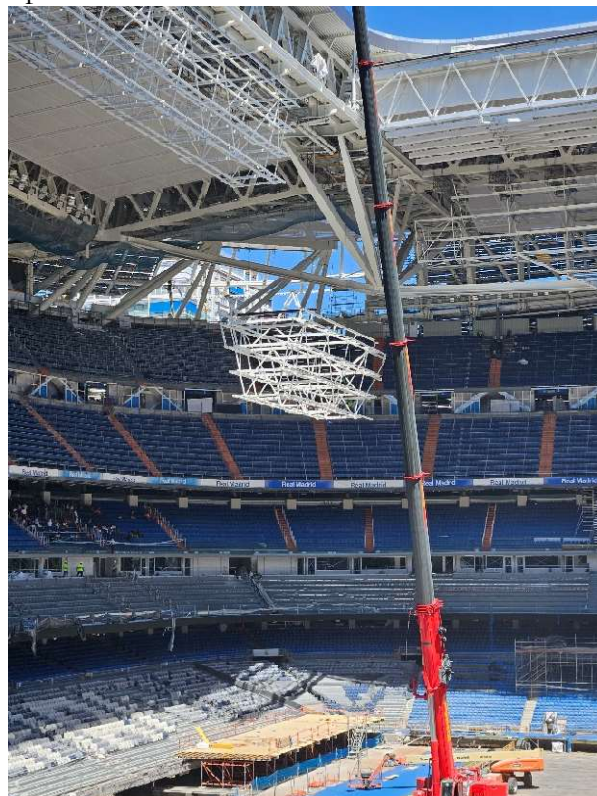


Figura 8. Izado desde plataforma de un módulo estructural en el lateral oeste.

5. Edificio museo

En el lateral del paseo de La Castellana se ha incorporado al estadio un edificio de 3 plantas colgado de una estructura puente denominada Corona que apoya en las torres B y C.

La corona, además de servir para sustentar el nuevo edificio museo, hace de deambulatorio en el nivel inferior, de terraza en el superior donde se ha ubicado un restaurante, y aloja varios cuartos para instalaciones y aseos.

La estructura de la corona es simétrica con una luz aproximada de 150 m entre apoyos (Torres B y C) y dos vanos de compensación de 25 m. Su estructura principal se compone de un cajón de sección 2×1.2 m en el cordón superior y dos cajones de 1.3×1.2 m creando una sección triangular por medio de diagonales de sección circular de diámetro 711 mm que sube a los 914 mm junto a los apoyos. La estructura secundaria soporta forjados colaborantes.



Figura 9. Vista general de la corona en el momento del izado del edificio museo. Lateral oeste en el paseo de La Castellana.

La estructura del edificio museo es una viga celosía de 105 m de longitud, 10 m de alto y 7.25 m de ancho. Los forjados de las plantas son colaborantes, y las conexiones entre niveles de la estructura del museo y niveles del estadio se realizan mediante forjados basculantes que se adaptan a los movimientos relativos entre ambas estructuras.

El proceso constructivo de estos elementos se realizó izando los módulos estructurales de la corona hasta unas torres de

apoyo para que estos descansasen a la cota de montaje.

El edificio museo se montó al completo sobre una plataforma elevada anexa a la fachada del estadio, que al igual que la utilizada en el montaje de las cerchas secundarias de cubierta, debía permitir la evacuación del público del estadio y el posible acceso de los camiones de bomberos, para posteriormente ser izada por el método de elevación heavy lifting hasta ser fijada a los cordones inferiores de la estructura corona.

6. Edificio del este

En el lateral de la calle del Padre Damián se ha ejecutado un edificio nuevo adosado al estadio que integra la tienda del Real Madrid, restaurantes y oficinas del club, además dar acceso al palco presidencial.

Estructuralmente es quizá el elemento más canónico ya que se trata de un edificio de nueva planta de estructura metálica atornillada y forjados colaborantes. En los niveles superiores aloja la corona con la terraza Skywalk, y en su interior los péndulos invertidos que sustentan la cubierta.

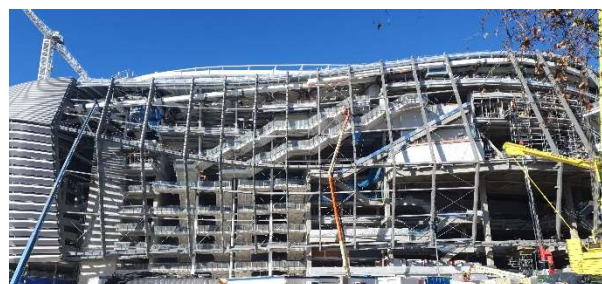


Figura 10. Vista frontal del nuevo edificio del este donde se puede ver la subestructura de bastidores que dan soporte a la fachada de laminales. Calle de Padre Damián

6. Galería de técnica y nuevo acceso al terreno de juego

La reforma del estadio pretende dar más un uso comercial a prácticamente todos los espacios del estadio, por lo que es necesario racionalizar los recorridos de mercancías e instalaciones. Con

este fin se ha ejecutado una galería/anillo bajo las gradas bajas, distribuyéndose posteriormente a los niveles superiores del estadio por montacargas y patinillos situados en las esquinas del estadio.

Para la conexión entre el aparcamiento, la galería perimetral y el terreno de juego se ha ejecutado un nuevo acceso dotado de una grada abatible, compatible con la entrada al terreno de juego de vehículos de grandes dimensiones necesarios para el montaje de los espectáculos que puede albergar el estadio.

6.1 Galería técnica perimetral

La galería técnica recorre todo el perímetro del terreno de juego. Ejecutada mediante unas pantallas de micropilotes conectados por losas de hormigón armado que hacen de suelo y techo. Su ancho varía de los 2.50 m a los 3.8 m, y aunque su altura es variable tiene un gálibo mínimo de 2.20 m.



Figura 11. Vista de un tramo de la galería perimetral con los micropilotes aun visibles.

La excavación de la galería se proyectó y comenzó a excavar en mina, al abrigo de las pantallas de micropilotes y las gradas del estadio, pero tras prohibirse la entrada de espectadores al estadio por la pandemia del virus Covid-19, se aprovechó la circunstancia para realizar la excavación a cielo abierto. Solo el tramo del fondo sur se ejecutó en mina.

Por esta galería también se accede al invernadero subterráneo denominado Hipogeo.

6.2 Nuevo acceso al terreno de juego

Dada la estrechez del acceso al terreno de juego preexistente, se proyectó un nuevo túnel de acceso compatible con vehículos de grandes dimensiones que puedan introducir y sacar materiales y equipos a la losa del terreno de juego. Este nuevo acceso permitió ejecutar el videomarcador, tarea que se habría demorado en el tiempo si se hubiese tenido que ejecutar desde las gradas.

El nuevo está compuesto por pantallas de micropilotes arriostrados con losas de H.A. que forman el techo y la trampa del túnel y varias hiladas de estampidores, y para salvar las gradas, estas se han sustituido por una grada abatible metálica.

El nuevo túnel se ha ejecutado entre dos pórticos del estadio, por lo fue necesario recalzarlos con micropilotes y conectar los pilares con muros de hormigón armado.

7. Hipogeo y otras actuaciones en el terreno de juego.

La actuación quizá más innovadora y sorprendente de la reforma del estadio es el invernadero subterráneo denominado Hipogeo.



Figura 12. Bandeja de césped en el interior del Hipogeo.

Durante la temporada deportiva, el césped del estadio es intocable, solo lo pisan los jardineros y los jugadores en día de partido, lo que impide aumentar la utilización del estadio (de los 365

días que tiene un año, no llegan a jugarse 30 partidos en el estadio), por lo que retirar el césped de la ecuación abría las puertas a poder utilizar el estadio durante la temporada y realizar eventos de todo tipo.

Con este fin se ideó mantener el césped en un invernadero subterráneo los días que no hay competición deportiva y dejar expedita el área que ocupaba el terreno de juego.

Para esta actuación se tuvo que reforzar el túnel de cercanías que discurre bajo el estadio y lo cruza de forma oblicua de norte a sur. Este túnel es anterior al estadio tiene una bóveda de fábrica de ladrillo, y con el paso del tiempo se le había retirado la casi totalidad de su montera (llegando a apoyar una grada en la bóveda del túnel).

Para impedir que el tráfico de vehículos pesados pudiese afectar al túnel (que es posiblemente el principal corredor ferroviario de Madrid), se ejecutó un escudo en toda su longitud por medio de una losa apoyada en micropilotes, también se reforzó el interior del túnel con cerchas metálicas y se realizó una monitorización que evaluase los movimientos que llegaban a la bóveda del túnel.



Figura 13. Vista del hipogeo en el momento en el que una bandeja está saliendo al terreno de juego.

También en el terreno de juego se modificó la sección de una galería colector visitable de aguas para que por su altura no interfiriese con la nueva losa de H.A. del terreno de juego.

Con la resolución de estos puntos se acomete la construcción del denominado Hipogeo situado en el borde de la grada baja del lateral oeste del estadio. Se trata de un volumen de dimensiones de 108 m por 19.4 m, y 34.2 m de profundidad (40 m en los cabeceros norte y sur).

La estructura de contención de tierras es un cajón de pantallas de H.A de 1.00 m de espesor libres de estampidores o forjados para permitir el movimiento de las 6 bandejas de césped (En los cabeceros si hay forjados para alojar los almacenes y cuartos técnicos). Las pantallas constan de 5 niveles de anclajes permanentes.

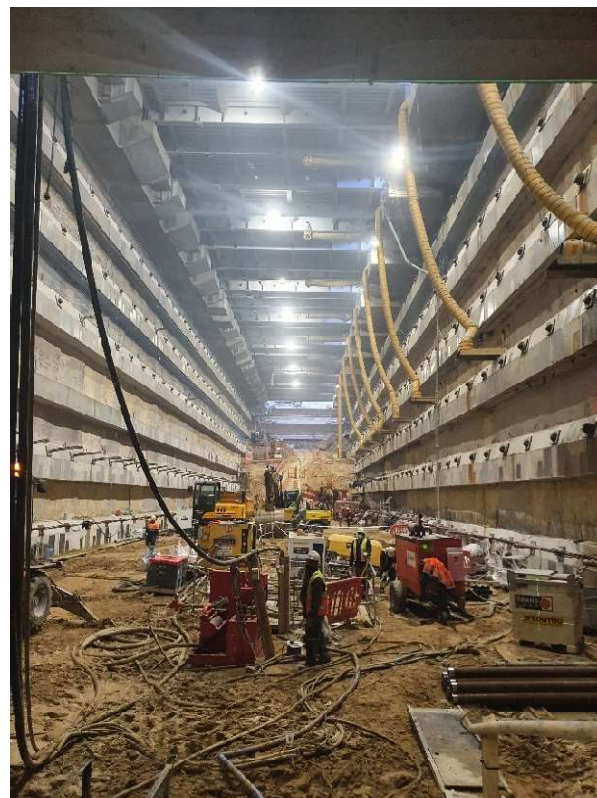
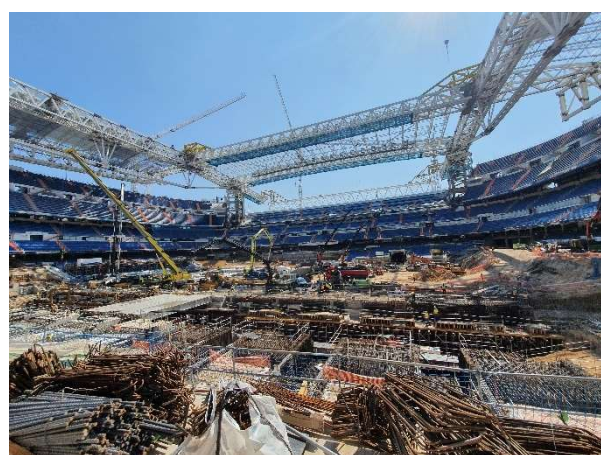


Figura 14. Vista del interior del hipogeo en la fase de excavación.

La ejecución de esta estructura de contención estaba planificada inicialmente a lo largo de varias temporadas deportivas, durante los parones veraniegos, ya que la ejecución de las pantallas perimetrales ocupaba y se trabajaba desde el terreno de juego, pero el cierre de los estadios al público durante la pandemia favoreció su ejecución y las pantallas quedaron

terminadas antes de la vuelta del público al estadio.



Figuras 15 y 16. Vistas del terreno de juego durante los trabajos de ejecución de las pantallas del hipogeo.

8. Ampliación del aparcamiento junto a la plaza de los Sagrados Corazones

La reforma del estadio incluyó la demolición del edificio institucional y la tienda del Real Madrid, y el centro comercial la Esquina del Bernabéu y su aparcamiento.

De este aparcamiento solo se han mantenido las pantallas, a las que se adosó y conectó una nueva pantalla de contención que ha permitido ampliar el aparcamiento en una planta más, con alturas entre plantas mucho más generosas (la primera planta tiene un galibo de 5.50 m).

Los forjados de las plantas del aparcamiento son losas reticulares a excepción de la losa de la cubierta, de debido a las grandes

cargas de la plaza que soporta y las grandes luces que salva, es postensada.



Figura 17. Vista de la ejecución de la fase 2 del aparcamiento.

9. Refuerzos estructurales de la estructura original del estadio de hormigón armado

Con el fin de adaptar el estadio a las exigencias de las nuevas actividades y usos del estadio se proyectó y ejecutó el refuerzo de las losas de forjado de los primeros 5 niveles (estructura original del estadio), las vigas que los sustentan y los pilares de la primera alineación del estadio (las alineaciones 3ª y 4ª ya se recrecieron en la ampliación del estadio incorporando el 3er y 4º anfiteatro).

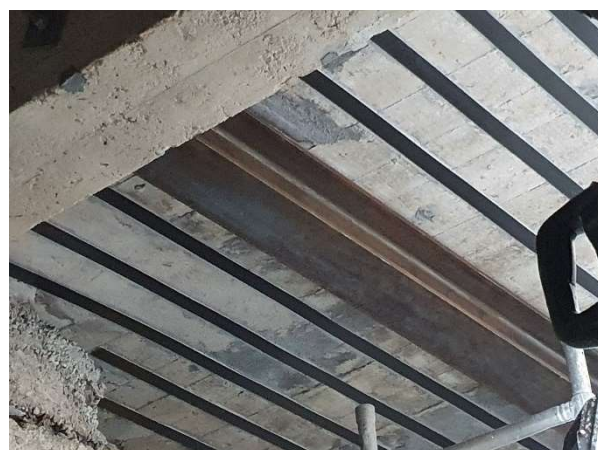


Figura 18. Refuerzo de losa con láminas de fibras de carbono (FRP) y nuevo perfil metálico de apoyo.

Las estructuras de H.A. tenían muy poco recubrimiento quedando las armaduras de muchas losas y vigas a la vista con pérdida de sección de acero por corrosión, razón que obligó

a reparar y reforzar la totalidad de las losas y la casi totalidad de las vigas del estadio.

Las losas se han recrecido en su cara superior y algunas se han reforzado con láminas de fibras de carbono en su cara inferior.

Las vigas se han reforzado con láminas y fibras de carbono, con la colocación de vigas metálicas adosadas, o recreciendo su sección.

Los pilares de la primera alineación del estadio se han recrecido y reparado, al igual que algunos de la 3ª alineación del lateral este.

También se ha reforzado los pilares apantallados de la 4ª alineación del estadio en su quiebro a media altura, disponiendo barras comprimidas y recreciendo el quiebro con tacones de H.A.

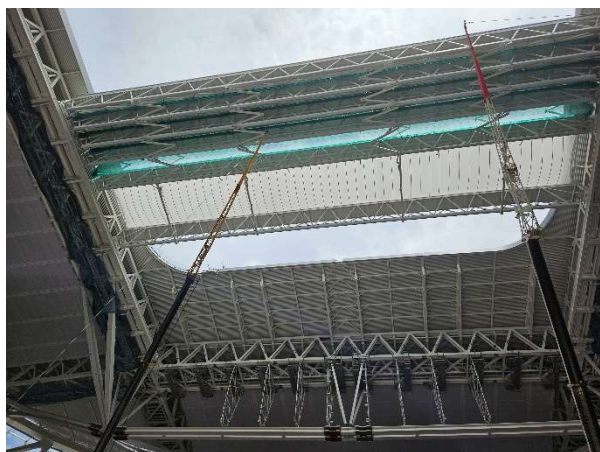


Figura 19. Vista de la cubierta retráctil en fase de pruebas. Vista del fondo norte.

Agradecimientos

Quiero mostrar mi agradecimiento a Ayesa y al Real Madrid C.F. por seguir dándome su confianza en los grandes proyectos en los que me embarcan. A mi familia de la DF de la obra, especialmente a Carlota, Guillermo, Sara, Estefanía, Luis y Fernanda por ayudarme en el día a día estructural durante estos años, y a María José, Cristina, Víctor y Luis por ponérmelo tan fácil con el diseño y modificaciones realizadas durante el devenir de la obra. No puedo olvidar a mi familia, por su apoyo incondicional incluso cuando no aparezco durante todas sus vacaciones veraniegas.

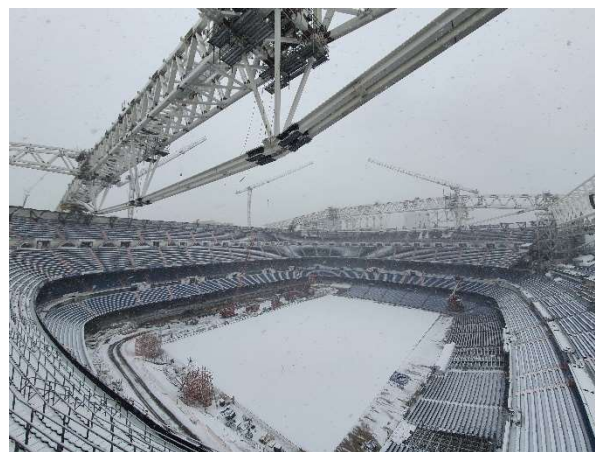


Figura 20. Vista del estadio tras la nevada Filomena. Vista desde el fondo sur.



Figura 21. Localización de actuaciones.